

RTM 技术的发展及在航空工业的应用

Development and Application of RTM to Aviation Industry

李萍 陈祥宝 (北京航空材料研究院)

Li Ping Chen Xiangbao (National Key Laboratory of Advanced Composite Materials, Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

[摘要] 树脂传递模塑法(RTM)是一种成本低、效益好的复合材料成型工艺。综述了RTM工艺过程的模拟模型、影响RTM工艺的因素以及RTM技术在航空领域的应用。

关键词 树脂传递模塑法 模拟 应用

[Abstract] Resin Transfer Moulding (RTM) is an established process for manufacturing polymer matrix composites with low cost and high benefit. This paper reviewed filling simulations in RTM, some effects on RTM and application of RTM to aviation industry.

Keywords RTM simulation application

1 前言

RTM技术是一种适宜多品种、中批量、高质量复合材料制品生产的成型技术,近年来得到迅速发展。美国国家宇航局对RTM给予了高度重视,并认为该技术是制造结构材料的一种成本低、效益好的方法。和其它传统复合材料生产技术相比,RTM有许多优点:能够制造高质量、高精度、低孔隙率、高纤维含量的复杂复合材料构件,无需胶衣树脂也可获得光滑的双表面,产品从设计到投产时间短,生产效率高。RTM模具和产品可采用CAD进行设计,模具制造容易,材料选择广。RTM成型的构件与管件易于实现局部增强以及局部加厚,带芯材的复合材料能一次成型。RTM成型过程中挥发份少,有利于劳动保护和环境保护。

本文着重叙述RTM的模拟及其影响因素和在航空工业的应用概况。

2 RTM的模拟

RTM工艺条件的优化和确定,需要了解各种参数的影响,RTM工艺全过程的模拟是分析这些参数之间关系的有效工具。近年来,Young和Wymer^[1~3]提出了等温和非等温条件下的2维、3维模内流动模型。Trochu等人^[4,5]提出了用计算机模拟RTM成型工艺全过程。

2.1 流动模型

在RTM工艺中,模腔充满的过程是树脂通过有孔介质的流动过程,Darcy定律是描述这种通过有孔增强材料流动过程而常用的方程:

$$V = - \frac{K}{\eta} \nabla P \quad (1)$$

其中 V 是表面速度矢量, K 是有孔介质的渗透率张量, P 是压力, η 是流体的粘度。为了模拟RTM的注入过程,首先假设预先放置的纤维织物为刚性体且在模腔充满的过程中没有变形发生;另外,由于树脂的 Re 值低,所以惯性影响可忽略。在这些假设条件下,Darcy定律可写为如下形式:

$$V = - \frac{K}{\eta} (\nabla P - g) \quad (2)$$

其中 g 为重力矢量。对于一个不可压缩流体,连续方程可简写成如下形式:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

u , v 和 w 分别为表面速度矢量 V 在 x , y , z 方向的分量。

在入口处边界或是恒压或是恒速,所以在 x 方向的流动综合式(1)写为:

$$Q = \int_0^h \int_0^w K_x (-dp/dx) dy dz \quad (4)$$

其中 Q 是体积流率, h 和 w 是纤维织物的厚度和宽度, K_x 是渗透率张量在 x 方向的分量。如果流体的不均匀性可以忽略,则式(4)可写成:

$$Q = - K_x A (-P/X) / \eta \quad (5)$$

其中 A 是流域内交叉部分的面。

2.2 热传递和固化过程的模拟

当树脂流经纤维预成型体时,在模壁、纤维预成型体及树脂间将发生热传递。热传递需要从三个方向考

虑：在厚度方向上的能量平衡，平面方向的对流和当固化开始时由于放热反应产生的热。值得注意的是在热传递分析上存在分歧：一些人提出两阶段模型，另一些人则提出平衡模型。两阶段模型仅考虑了流体与纤维之间的热对流，没有系统考虑在对流过程中存在的树脂与预成型体之间的热传递系数，这样就必须通过实验确定每一树脂/纤维预成型体的组合。平衡模型研究假设在每一点流体和纤维介质温度相同。实验表明，平衡模型的假设对象 RTM 这样慢的流动过程是有效的。

$$\text{热传递方程为: } C_p \left(\frac{T}{t} + V \right) T = K T \quad (6)$$

其中 T 为温度， C_p 为热容， t 为时间。

假设树脂与纤维之间的热传递是瞬时的，认为是一薄的壳体形状，只考虑平面内的热传递，忽略平面外的热传递，厚度方向上的对流则可忽略。在这些假设条件下，能量和物质平衡方程可写成：

$$\text{能量: } C_p \frac{T}{t} + r C_{Pr} V T = k^2 T + H_m \quad (7)$$

$$\text{物质: } \frac{1}{t} + V = m \quad (8)$$

其中 $\frac{1}{t}$ 是树脂的转化率， r 是粘度， m 是物质生成率，是纤维织物的孔隙率， H 是单位体积的生成焓， k 为热传导系数。

在固化过程中，树脂不流动，所以能量与物质平衡方程可简写为：

$$C_p \frac{T}{t} = k^2 T + H_m \quad (9)$$

$$\frac{1}{t} = m. \quad (10)$$

2.3 边界情况

在流体前端

$$P = 0 \quad (11)$$

$$\frac{D}{D_t} (f C_p T) = f H_m + \frac{df}{dt} (1 -) f C_{pf} (T_{f0} - T) \quad (12)$$

$$\frac{D}{D_t} (f) = f_m \quad (13)$$

其中 f 是树脂的体积含量。(10) 式左边内能的变化等于右边的反应热以及树脂和纤维之间的热交换，流体前端的热传递可以忽略以简化公式。

在入口处

(a) 恒压注入

$$P = P_0 \quad T = T_{resin} = 0 \quad (14)$$

(b) 恒速注入

$$\frac{1}{s} \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{P}{x} - g_x \\ \frac{P}{y} - g_y \\ \frac{P}{z} - g_z \end{bmatrix} ds = - Q \quad (15)$$

$$T = T_{resin} = 0 \quad (16)$$

在模具的边界

$$\frac{D}{n} = 0 \quad T = T_{wall} \quad (17)$$

其中 Q 是入口处的体积流率， T_{resin} 是树脂初始温度， T_{wall} 是模壁温度。

3 影响 RTM 成型工艺的因素

影响 RTM 成型工艺的因素包括增强材料 (如纤维类型、方向、表面处理、体积含量、排布顺序、编织)、树脂特性、模具的结构、预热温度、注射温度、辅助真空和环境条件等，下面讨论其中几个主要因素对 RTM 成型工艺的影响。

3.1 树脂^[6]

RTM 对基体树脂工艺性的要求可概括为：室温或较低温度下具有低粘度及一定的贮存期 (如 48h)；树脂对增强材料具有良好的浸润性、匹配性、粘附性；树脂在固化温度下具有良好的反应性，且后处理温度不应过高 (如 200)。RTM 使用的树脂基体包括：不饱和聚酯树脂，乙烯基酯树脂，环氧树脂，双马来酰亚胺树脂，热塑性树脂。目前国外主要研究报道的树脂为环氧树脂，美国 3M 公司研制的 Scotchply PR 500 新型环氧树脂特别适应湿热环境，很适合 RTM 工艺。

3.2 注入压力^[6,7]

注入压力的选择一直是 RTM 工业生产中一个有争议的问题。有人认为采用低压注入，可促进树脂对纤维表面的浸润；有人则赞成采用高压注入，认为这样可以逐出残余空气。Hayward 实验结果表明，不同注射压力对复合材料的剪切强度的影响很小，对弯曲强度影响稍大。但 Young 的相似研究表明，仅在室温下低压注入，复合材料的弯曲强度稍低，而在高温 (如 50) 下注入压力的变化对复合材料性能几乎没有影响。

3.3 真空辅助法 (VARTM)^[6,7]

RTM 技术中最难解决的问题之一是最终产品中残余物或气泡，VARTM 能够有效地解决这一问题。VARTM 是在注射树脂的同时，在排出口接真空泵抽真空。这样不仅增加树脂传递压力，排除了模具及树脂中的气泡和水分，更重要的是为树脂在模腔中打开通路，形成完整的通路。VARTM 能显著地减少最终产品中夹杂物和气泡的含量，进而提高产品的力学性能。另外，无论增强材料是编织的还是非编织的，无论树脂类型及粘度如何，VARTM 都能大大改善模塑过程中纤维的浸润性。

大量 VARTM 与 RTM 的比较实验结果表明：用普通的 RTM 技术，注入速度的增加将导致微孔含量的增

加;用 VARTM 技术,注入速度的增加不会导致微孔含量的增加。但如果 VARTM 中模具没有密封好,将会导致微孔含量的急剧增加。

3.4 温度^[6,8]

在 RTM 成型工艺中,模具在预热基础上的一个热循环包括四个阶段:树脂注入,树脂流入到模具中,离注射口越远温度降低越多;层间加热,这是发生在树脂注射结束后,热传递来自热的模具表面;树脂固化,是一放热反应,从离注射口最远点开始,在注射口达到放热高峰;冷却,是从放热最高温度降到正常模温。为了缩短 RTM 的工艺循环时间,通常将树脂注入到已预热的模具中。模温的选择一般根据树脂的特性(如一定温度下的凝胶时间),模温对最终产品的质量有较大影响。Young 实验结果表明,在低压(51.7KPa)下弯曲强度和模量随模温的升高稍有增加;而在较高压(172.4KPa)下,弯曲强度随预热温度的升高而降低。Hayward 认为强度随模温的明显降低完全是由于复合材料板材中树脂固化程度不同而引起的。如果模具加热到适当温度,则不会出现因树脂固化程度不均而影响复合材料性能的问题。

4 RTM 在航空工业的应用

RTM 工艺的起源可追溯到40年代末期,最初是为了适应飞机雷达罩成型而发展起来的。随着 RTM 技术的发展,航空航天领域也越来越多地采用 RTM 技术成型高性能复合材料制件。

Boeing 公司用编织结构增强/RTM 技术制造了“J”形机骨架。道格拉斯公司采用缝合结构增强体/RTM 技术研制了机翼和机身蒙皮。对于这种带加筋结构的复合材料,利用 RTM 技术比一般传统的复合材料成型技术(预浸料/热压罐法)加工时间减少50%以上,且能提高复合材料的抗冲击性能,改善制件加强筋和蒙皮之间的整体性。空中客车公司利用碳纤维/玻璃纤维混杂织物作为增强材料,中温固化环氧树脂为基体树脂,利用 RTM 技术批量生产 A321发动机吊架尾部整流锥。和模

压技术相比,获得了生产成本降低30%的效果。利用 RTM 技术制备的实壁结构机头雷达罩,具有刚度高、透波性能好等优点,在各种型号飞机上得到广泛应用。BP 高级材料公司使用 RTM 技术成型了具有蜂窝式芯型结构增强的复杂几何体形状的波音757推进器转向风门。Hercules 公司使用 RTM 技术制造导弹机翼和其它部件,使用的预成型体包括碳纤维衣、玻璃纤维与碳纤维的混合物,其制造成本仅为连续纤维缠绕的1/4~1/3。Hercules 正在研制用 RTM 生产 Pegasus 三级触发器,其部件选用了 HBRF-55A 环氧树脂和 AS4碳纤维编织预成型体,部件独特而复杂的造型再次证明了 RTM 技术的优异的适应性。

参考文献

- 1 W. B. Young. Polym. Compos., 1994, 15 (2): 118 ~ 127
- 2 W. B. Young. J. Reinf. Plast. & Compos., 1995, 14: Apr. 310 ~ 332
- 3 S. A. Wymer & R. S. Engel. 9th Proc. Int. Conf. Compos. Mater. 1993: 537 ~ 544
- 4 F. Trochu, C. Hoareau & R. Gauvin. 9th Proc. Int. Conf. Compos. Mater. 1993: 481 ~ 488
- 5 F. Trochu, R. Gauvin. J. Reinf. Plast. & Compos. 1994, 13: 467 ~ 482
- 6 W. B. Young & C. W. Tsong. J. Reinf. Plast. & Compos. 1994, 13: 467 ~ 482
- 7 J. S. Hayward & B. Harris. SAMPE J. 1990, 26 (3): 39 ~ 46
- 8 C. D. Rudd & K. N. Kendall. Plast. Rub. & Compos. Proc. & Appl. 1994, 22 (4): 223 ~ 233

稿件收到日期: 1996. 8. 18.

修改稿收到日期: 1997. 9. 20.

李萍,女,1971年1月生,硕士研究生,北京航空材料研究院助理工程师,联系地址:北京市81信箱9分箱(邮编100095)。